

Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder

(Interpretations on quantum mechanics on a virtual Mach-Zehnder interferometer)

Fernanda Ostermann¹ e Sandra Denise Prado

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Recebido em 2/12/2004; Aceito em 21/2/2005

Neste trabalho analisamos o fenômeno da interferência quântica no interferômetro de Mach Zehnder - um arranjo experimental análogo ao experimento das duas fendas, porém mais simples - sob a luz das principais escolas de interpretação da mecânica quântica. Embora fortemente inspirados pelo trabalho de Pessoa Jr. [1]-[3], damos especial ênfase à Interpretação dos Muitos Mundos ou Universos Paralelos, que experimenta um crescente interesse tanto por parte da comunidade científica quanto de leigos. A Interpretação dos Muitos Mundos é uma corrente da mecânica quântica para a qual, além do mundo do qual somos conscientes, há muitos outros mundos similares que existem em paralelo no espaço e ao mesmo tempo. A existência destes outros mundos torna possível a remoção da aleatoriedade e da ação à distância da teoria quântica. Uma introdução básica de uma interpretação que tem estado presente nos meios de comunicação é uma importante contribuição para a formação inicial e continuada de professores de Física, principalmente quando se busca uma discussão mais conceitual sobre o tema.

Palavras-chave: interpretações da mecânica quântica, epistemologia, interferômetro de Mach-Zehnder.

The problem of quantum interference phenomena is analyzed on the Mach-Zehnder Interferometer - an experimental setup similar to double slits device, but much simpler - under the light of the main schools of interpretations of Quantum Mechanics. Although this is a work very based on Pessoa Jr [1]-[3], special emphasis is given to Many Worlds Interpretation due to its recent growing of interests within scientific community as much as within general public. The Many-Worlds Interpretation is an approach to Quantum Mechanics according to which, in addition to the world we are aware of directly, there are many other similar worlds that exist in parallel at the same space and time. The existence of the other worlds makes it possible to remove randomness and action at a distance from quantum theory. A basic introduction of an interpretation like Many Worlds that have been extensively present in the media is an important contribution to the initial and continued education for Physics Teachers, mainly when a more conceptual approach to the subject is aimed.

Keywords: interpretations of quantum mechanics, epistemology, Mach-Zehnder interferometer.

1. Introdução

A descoberta da expansão acelerada do Universo em 1998, assim como os recentes dados da sonda espacial WMAP de fevereiro de 2003 têm feito da astronomia, da astrofísica e da cosmologia, áreas de grande apelo público. Todas as velhas questões acerca da origem e destino do Universo, assim como de sua geometria e forma, encontram agora, nos dados experimentais, possibilidades de respostas [4]. A tecnologia tem permitido ao homem a observação de um universo ainda infante, pequeno e muito quente, constituído essencialmente por radiação e partículas microscópicas. Para descrever esse Universo primordial, que combina velocidades relativísticas com escalas microscópicas, pre-

cisamos recorrer à teoria da relatividade geral de Einstein e à mecânica quântica, que nesse limite, são teorias ainda incompatíveis. A cosmologia é uma das áreas que demanda dos cientistas a necessidade de melhor compreensão dos fundamentos da física do mundo microscópico, mas não é a única.

A literatura tem registrado um aumento significativo do interesse a respeito de questões sobre os fundamentos da mecânica quântica (MQ). Esse aumento certamente se deve ao imenso progresso feito nas últimas duas décadas em experiências com sistemas quânticos individuais. Este progresso tecnológico tornou possível a realização de muitos dos famosos experimentos mentais (*gedanken*) que foram importantes nos primeiros

¹E-mail: fernanda@if.ufrgs.br.

dias da teoria. Não só os experimentos confirmam a teoria em cada detalhe, mas eles também abriram portas para direções mais aplicadas que, certamente, levarão ao desenvolvimento de novas tecnologias como os computadores quânticos e a criptografia quântica. Essas linhas mais tecnológicas estão promovendo interdisciplinaridade tanto dentro da Física como entre a Física e as áreas afins como Ciências da Computação, Química e Matemática entre outras. A necessidade de comunicação entre profissionais de diferentes áreas de formação vem fomentando iniciativas de disciplinas que unem teoria de informação, computação e MQ para um público mais diversificado e tem exigido atenção especial aos problemas conceituais de entendimento e interpretação da MQ [5].

Primeiramente, precisaremos ressaltar a diferença entre formalismo e interpretação. Assim como outras teorias físicas, a MQ pode ser formalizada em termos de várias formulações axiomáticas. Seguindo Jammer [6], distinguiremos pelo menos duas componentes de uma teoria física T : (1) um formalismo abstrato F e (2) um conjunto R de regras de correspondência. O formalismo F , o esqueleto lógico da teoria, é um cálculo dedutivo, comumente axiomatizado, e, em geral, desprovido de qualquer sentido empírico. Embora o formalismo possa conter palavras como ‘partícula’ ou ‘estado’, sugerindo significado físico, esses termos não têm outro significado além daquele resultante do lugar que eles ocupam no contexto de F . Assim, F consiste em uma série de fórmulas que são postuladas e de outras fórmulas que são derivadas das primeiras em acordo com regras lógicas.

Para dar algum significado físico a F , algumas das fórmulas precisam ser correlacionadas com fenômenos observáveis ou operações empíricas. Essas correlações são expressas pelas regras de correspondência R . F sem R é um puro jogo com símbolos sem significado. Denotamos o formalismo F , quando então parcialmente interpretado por meio das relações de correspondência R , pelo símbolo F_R . É a interpretação de F_R que dá margem aos debatidos problemas filosóficos como a questão ontológica da ‘realidade física’. Como exemplo de F_R na MQ especificamente, encontramos, em seu nível mais elementar, a interpretação estatística introduzida por Born em 1926 [2], [6]-[8]. Ela estabelece que o quadrado absoluto da função de onda representa a probabilidade para observação de um certo resultado, por exemplo, a probabilidade de se encontrar o elétron em um certo volume do espaço. Neste nível de interpretação existe um consenso quase que completo entre os físicos, pois as predições que se pode obter da teoria aplicando esta regra concordam com todos os experimentos com excelente precisão.

Se nos restringíssemos ao uso da MQ exclusivamente para a predição de resultados experimentais ou se o seu ensino privilegiasse apenas o formal, nunca nos depararíamos com os problemas de interpretação. Essas

dificuldades parecem surgir justamente onde conceitos como entendimento, significado ou sentido são aplicados. No entanto, no âmbito da formação inicial e continuada de professores, é crucial que se busque uma abordagem mais conceitual e qualitativa da MQ. Ao contrário de ser uma desvalorização para essa formação, esse tipo de ensino requer do professor profundo conhecimento do conteúdo. Além disso, possíveis transposições didáticas para o ensino médio dependem fortemente de uma sólida formação conceitual, que só poderá ser construída se fundamentada em discussões epistemológicas e ontológicas. O conceitual e o epistemológico estão completamente imbricados quando perguntamos, por exemplo, o que a MQ poderia significar para nossa visão de mundo. A conceitualização de objetos quânticos - que pode ser ilustrada na pergunta “singela” de um aluno acerca da natureza do fóton - só pode ser feita à luz de uma postura filosófica que, se não estiver explicitada, pode levar a visões ingênuas e acríticas ou à idéia de que só é possível uma dada interpretação. A própria “epistemologia do aluno” não pode ser negligenciada, pois muitas de suas dificuldades no entendimento de conceitos da MQ são de natureza filosófica [9]. Portanto, qualquer tentativa de discussão dos conceitos envolvidos na MQ traz à tona elementos de sua epistemologia, sem os quais todo seu entendimento estará vazio de significado.

Pode-se considerar que, em resumo, a ontologia da MQ refere-se ao fato do objeto quântico ser concebido de maneira corpuscular, ondulatória ou dualista (onda e partícula) e a epistemologia na MQ lida com atitudes realistas (o mundo existe independente do sujeito que o percebe) ou positivistas (todo o nosso conhecimento deriva dos nossos sentidos) [2],[6],[10]. As dificuldades interpretativas dessa teoria dizem respeito tanto à forma pela qual a teoria se relaciona com os fenômenos quanto ao delineamento de uma ontologia que lhe seja apropriada.

Mostramos nesse trabalho que cada interpretação da MQ ou cada linha de pensamento contém um elemento que escapa a uma descrição completa e detalhada da experiência e que, por isso, diferentes interpretações coexistem. Todas as interpretações concordam umas com as outras quando se referem à predição do experimento e, portanto, não há meios - pelo menos imediatamente - de se diferenciá-las no laboratório [5]. Para ilustrarmos como as diferentes interpretações explicam a mesma experiência de modo às vezes bastante divergente, discutiremos nesse trabalho experiências com a luz.

Embora a teoria ondulatória da luz descreva o padrão de franjas claras e escuras na experiência da fenda dupla de Young [11], [12], através da superposição coerente de ondas, a explicação do Efeito Fotoelétrico de Einstein em 1905, propõe que a luz é constituída por corpúsculos de luz indivisíveis ou quanta, chamados de fótons [11], [12]. Além disso, versões da ex-

periência de Young feitas para elétrons, nêutrons e recentemente para moléculas de fulereno ou C_{60} [13] exibiram o mesmo padrão de interferência que os fótons. Então, como explicar o aparecimento das franjas de interferência quando se trabalha com corpúsculos, como fótons, átomos e mesmo moléculas, em vez de ondas? Para responder a essa pergunta, é preciso voltar a 1925, quando o físico francês Louis de Broglie (1829-1987) [2], [11], [12], postulou que partículas microscópicas, como elétrons, prótons e nêutrons entre outras, ora se comportam como corpúsculos, ora como ondas. Esse caráter dual ficou amplamente conhecido como dualidade onda-partícula. A luz é, talvez, o caso mais conhecido desse fenômeno. Para entendermos melhor esse problema, analisaremos o comportamento da luz no interferômetro de Mach-Zehnder em ambos regimes: clássico (teoria ondulatória) e quântico (fótons).

No presente trabalho, visamos às seguintes contribuições:

1. Uma abordagem mais detalhada do fenômeno da interferência do fóton único, que é essencial para o entendimento das disparidades entre os fenômenos físicos da escala microscópica (mecânica quântica) e aqueles da escala macroscópica (mecânica clássica ou Newtoniana);
2. A introdução da Interpretação dos Muitos Mundos na literatura em português para professores de Física. Essa interpretação vem ganhando destaque nos meios de comunicação e nas revistas de divulgação científica, dado seu vínculo com questões modernas da área de cosmologia principalmente;
3. A abordagem de algumas das principais interpretações da mecânica quântica, inclusive da Interpretação dos Muitos Mundos, para explicar a experiência do fóton no interferômetro de Mach-Zehnder em regime monofotônico, com o auxílio de um simulador de fácil acessibilidade disponível na rede www [14], [15].

2. Interferômetro de Mach-Zehnder

O interferômetro de Mach Zehnder (IMZ) mostrado na Fig. (1) é um arranjo experimental totalmente análogo ao experimento das duas fendas, porém mais simples, onde se pode observar interferência de ondas. Este aparato, inventado há cerca de 100 anos, vem sendo bastante explorado em experiências recentes que envolvem fundamentos de MQ, além de aparecer com relativa frequência em artigos da área de ensino em Física por ser bastante apropriado em termos didáticos [2],[14]. A Fig. (1) foi obtida de um programa livre de Muller e Wiesner [15] que simula um laboratório virtual no qual várias experiências podem ser realizadas [14].



Figura 1 - Interferômetro de Mach-Zehnder [15]. Na perspectiva de 40° mostrada, vê-se a fonte à direita no trilho interno e o anteparo à esquerda no trilho externo. Há dois espelhos semi-refletores: o mais próximo à fonte no trilho interno e o mais próximo ao anteparo no trilho externo. Os outros dois espelhos são totalmente refletores.

O IMZ representado na Fig. (1) é composto de dois espelhos semi-refletores ou semi-prateados (espelho mais à esquerda no trilho do anteparo e espelho mais à direita, no trilho da fonte). Esses espelhos são, comumente, chamados divisores de feixes, pois transmitem 50% da luz incidente e refletem os outros 50%. Há também dois espelhos comuns 100% refletores e um detector (anteparo). As distâncias entre os espelhos podem ser ajustadas de acordo com o objetivo do experimento, mas os espelhos devem estar precisamente alinhados para que o ângulo de incidência do feixe seja sempre de 45 graus. No caso deste programa [15], os dois braços do interferômetro ou os dois caminhos ópticos, são ligeiramente diferentes, de forma que um padrão de anéis circulares, mostrado na Fig. (3), aparece no anteparo quando a fonte é de luz laser.

Distinguiremos dois regimes importantes aqui: o regime clássico explicado pela teoria ondulatória clássica e o regime quântico, no qual se reduz a intensidade do feixe à emissão de fótons individuais - regime monofotônico. Antes, porém, veremos como funciona o IMZ clássico.

Para padronização ao longo do texto, o diagrama na Fig. (2) mostra as siglas adotadas: E1 e E2 para os espelhos comuns, S1 e S2 para os espelhos semi-refletores, caminho óptico A para o feixe transmitido em S1 e caminho óptico B para o feixe refletido em S1.

2.1. O interferômetro de Mach-Zehnder clássico - Interferência de ondas

Quando se coloca uma fonte de luz laser no IMZ devidamente alinhado, a luz forma um padrão de anéis circulares no anteparo.

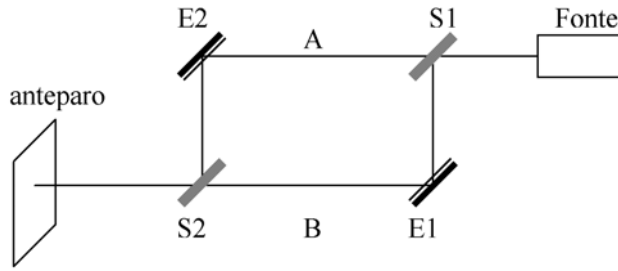


Figura 2 - Esquema do interferômetro de Mach-Zehnder. S1 e S2 são espelhos semi-refletores, E1 e E2 são espelhos 100% refletor e A e B representam os caminhos ópticos dos feixes que chegam ao anteparo.

Para explicarmos o resultado dessa simulação, recorreremos à teoria eletromagnética de Maxwell ou teoria ondulatória da luz, que estabelece que a luz é uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo à velocidade de 300.000 km/s e cuja intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico associado. As ondas de luz não podem ser vistas como as ondas na superfície de um lago ou como ondas em uma corda, mas são entidades físicas, são reais e podem portanto, ser detectadas por aparelhos apropriados. Na realidade, tudo o que acontece para uma onda mecânica como as ondas numa corda, acontece também para as ondas eletromagnéticas, com o diferencial de que somente as últimas podem se propagar no vácuo.

A onda de luz plano-polarizada de um laser típico como o da Fig. (3), pode ser descrita por uma função oscilatória que depende de posição e tempo tal como: $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t)$, onde E_0 representa a amplitude do campo elétrico, $k = 2\pi/\lambda$ o número onda, λ o comprimento de onda, $\omega = 2\pi/f$ a frequência angular e f a frequência. Se fixarmos uma posição $x = x'$, o campo elétrico \vec{E} oscila com o tempo entre $-\vec{E}_0$ e \vec{E}_0 passando por zero, ou seja, a onda tem máximos (vales) e mínimos (depressões) - o mesmo acontece se fixarmos um instante de tempo e estudarmos a onda como função da posição. Agora imagine as possibilidades de combinarmos duas ondas como essa: dependendo da defasagem entre elas poderemos combinar vale com vale (defasagem nula) obtendo uma amplitude duas vezes maior ou podemos ainda combinar vales com depressões (ondas totalmente defasadas) obtendo uma amplitude resultante nula (escuridão). A diferença de comprimento das trajetórias dos feixes (caminho óptico) que atingem o anteparo permite a formação do padrão de interferência observado na Fig. (3). Quando um vale de uma onda encontra o vale da outra, ocorre um 'reforço' como se as duas se somassem e o mesmo ocorre quando a crista de uma onda coincide com a de outra. Dizemos assim, que há uma interferência construtiva. Mas, quando um vale encontra uma crista (ou vice-versa) ocorre uma interferência destrutiva. Desse modo, podemos explicar o aparecimento das franjas claras no anteparo, que são o resultado de ondas que interferem construtivamente,

formando regiões iluminadas. Já as franjas escuras indicam que naquela região, as ondas estão interferindo destrutivamente, causando sombras no anteparo.

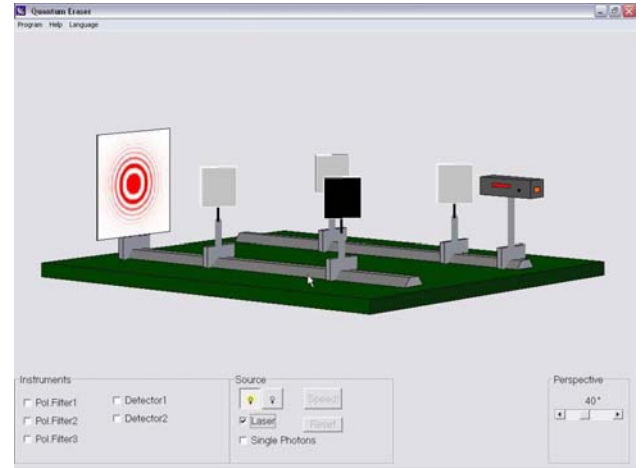


Figura 3 - Interferômetro de Mach-Zehnder [15] com a fonte de luz laser ativa (regime clássico). Observa-se a formação do padrão de interferência no anteparo.

A onda que deixa a fonte incide no espelho S1 (ver Fig. (2)) dividindo-se em uma parte transmitida que segue o caminho A e outra refletida que segue o caminho B. Esses feixes são posteriormente refletidos nos espelhos comuns dirigindo-se então ao espelho S2. A defasagem total ϕ dos feixes que chegam ao anteparo provindos dos dois caminhos A e B pode ser calculada para cada posição no anteparo. Da teoria de Maxwell, a intensidade da luz em qualquer ponto do anteparo é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico resultante nesta posição. Partindo desse resultado, os cálculos são simples e bastante ilustrativos [11], [12].

Seja $2I_0$ a intensidade do feixe que atinge o espelho S1. Esse feixe é dividido em duas partes ou duas ondas de iguais intensidades, I_0 , e o campo elétrico associado a cada onda é E_0 . Essas ondas propagam-se pelos caminhos A e B combinando-se posteriormente no anteparo da seguinte maneira:

$$E_R = E_0 \sin(kx - \omega t) + E_0 \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (1)$$

Essa expressão descreve simplesmente a soma de duas ondas (superposição) que estão defasadas entre si por uma constante ϕ numa dada posição no anteparo. Um ingrediente fundamental para que se possa ver a interferência é que haja coerência entre as ondas que se separam no espelho S1. Isso significa que deve existir um sincronismo entre as duas ondas, de modo que as regiões de interferência construtiva e destrutiva permaneçam inalteradas com o tempo, ou seja, a defasagem ϕ é independente do tempo. Caso não ocorra essa sincronia (dizemos então que as duas ondas são incoerentes), as franjas claras e escuras flutuam rapidamente de um lado para o outro no anteparo e não

podemos ver a interferência. A necessidade de luz coerente implica o uso de fontes de luz como laser.

A Eq. (1) pode ser escrita de um modo mais compacto e fisicamente mais esclarecedora usando-se a relação trigonométrica, $\sin(a+b) + \sin(a-b) = 2\sin(a)\cos(b)$ com $a = kx + \omega t + \phi/2$ e $b = -\phi/2$. Lembrando-se que cosseno é uma função par, de forma que $\cos(\phi/2) = \cos(-\phi/2)$, obtemos o campo resultante E_R :

$$E_R = 2E_0 \cos(\phi/2) \sin(kx - \omega t + \phi/2). \quad (2)$$

A Eq. (2) mostra que a superposição coerente de duas ondas de mesma amplitude propagando-se na mesma direção e defasadas de ϕ , resulta também uma onda eletromagnética com amplitude $E' = 2E_0 \cos(\phi/2)$ na mesma direção de propagação das ondas originárias. Assim, de acordo com a teoria ondulatória da luz, a intensidade da luz numa dada posição do anteparo é proporcional ao quadrado da amplitude E' e depende da diferença de fase ϕ entre os feixes que se combinam neste ponto, ou seja:

$$I \propto 4E_0^2 \cos^2(\phi/2) \quad (3)$$

Como consequência, a intensidade I da luz distribuída sobre o anteparo é, essencialmente, proporcional ao produto do quadrado da amplitude do campo elétrico e modulada com uma função periódica da defasagem ϕ dos dois feixes que se combinam em S2. Note que posições sobre o anteparo nas quais $\phi = 2\pi$ têm máximos de intensidade ou são regiões de interferência construtiva, enquanto que a intensidade é nula (escuro) em regiões do anteparo onde $\phi = \pi$.

2.2. O Interferômetro de Mach-Zehnder quântico - Interferência de um fóton

Para tornar a experiência da luz no IMZ um experimento quântico, é necessário diminuir a intensidade da fonte. No regime quântico, falamos em intensidade, não mais nos referindo à amplitude do campo elétrico, mas sim à taxa de números de fótons emitidos pela fonte. Os resultados mais interessantes do ponto de vista da MQ, emergem no limite da emissão de um fóton por vez - o regime monofotônico.

Quando um único fóton entra no IMZ devidamente alinhado, há detecção puntual somente em certas posições sobre o anteparo.

Na MQ, o estado de um fóton de energia E pode ser representado por uma função de onda complexa, $\psi(z, t) = C \exp(\pm ikx) \exp(-i\omega t)$ com frequência $\omega = E/\hbar$ e número de onda $k = 2\pi/\lambda$. C é uma constante, uma amplitude de probabilidade; λ indica o comprimento de onda, \hbar é a constante de Planck e os sinais \pm denotam a onda que viaja para à direita (+) e para à esquerda (-) em x .

O formalismo da MQ estabelece que no regime monofotônico, o espelho S1 coloca o fóton em uma superposição de dois estados: o estado do fóton que rumo pelo caminho A e o estado do fóton que rumo pelo caminho B. Essas duas possibilidades, que seriam excludentes ou ortogonais para um fóton de Einstein, geram o que chamamos de auto-estados do fóton no IMZ. O estado geral do fóton no IMZ é representado pela superposição dos dois auto-estados, de forma que:

$$\Psi(x, t) = (\psi_A + \psi_B)/\sqrt{2}. \quad (4)$$

Por construção, o fóton de Einstein poderia seguir pelos caminhos A ou B com a mesma probabilidade (1/2) e esta condição é colocada no estado do fóton dividindo-se os estados ortogonais pela constante $(1/\sqrt{2})$. Vale lembrar que o quadrado dessa constante corresponde à probabilidade de se detectar o fóton em um dos auto-estados, no caminho A ou no caminho B, de acordo com a interpretação probabilística de Born. Sem perda de generalidade, podemos assumir que o estado do fóton (Eq. (4)) no espelho S2 é dado em termos dos auto-estados:

$$\begin{aligned} \psi_A &= C \exp(ikx - i\omega t) \quad e \\ \psi_B &= C \exp(ikx - i\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (5)$$

onde ϕ indica a defasagem (constante) entre os caminhos ópticos A e B.

Assim, podemos encontrar a função densidade de probabilidade $|\Psi(x, t)|^2$ de detecção do fóton em qualquer ponto do anteparo através do Postulado de Born das probabilidades:

$$\begin{aligned} |\Psi(x, t)|^2 &= \frac{1}{2} |\psi_A + \psi_B|^2 = \\ &= \frac{1}{2} |C|^2 (\psi_A^* + \psi_B^*) (\psi_A + \psi_B) \end{aligned} \quad (6)$$

onde $\psi_A^* = C^* \exp(-ikx + i\omega t)$ denota o complexo conjugado de ψ_A e $|C|^2 = C^*C$ é o módulo quadrado de C . Substituindo-se as Eqs. (5) em (6) e após um pouco de álgebra obtemos:

$$|\Psi(x, t)|^2 = |C|^2 \frac{1 + \cos(\phi)}{2} \quad (7)$$

A Eq. (7) poderá ainda ser escrita de modo mais compactado usando-se a relação $(1 + \cos(\phi))/2 = \cos^2(\phi/2)$ e assumindo, sem perda de generalidade C como uma constante real, de modo que:

$$|\Psi(x, t)|^2 = C^2 \cos^2(\phi/2) \quad (8)$$

A Eq. (8) é matematicamente análoga à Eq. (3) obtida para interferência de ondas, mas devemos ter cuidado quanto ao seu significado. Como no regime clássico, também temos uma fase global ϕ que depende da particular posição no anteparo. No entanto, no

regime quântico (monofotônico) regiões onde $\phi = \pi$ representam regiões em que a probabilidade de detecção do fóton no anteparo é nula; e em regiões nas quais $\phi = 2\pi$ há probabilidade máxima para detecção do fóton. O processo de detecção do fóton no anteparo é sempre puntual, mas um padrão de interferência se forma após a detecção de muitos fótons, como é ilustrado na Fig. (4), para a simulação de 3419 fótons. Diferentemente da mecânica clássica, na qual a posição de detecção do fóton poderia ser, em princípio, pré-determinada, se dadas às condições iniciais, a MQ não permite nenhuma previsão em relação à posição de uma única detecção, mas permite uma previsão precisa para as estatísticas de muitas detecções de fótons identicamente preparados.

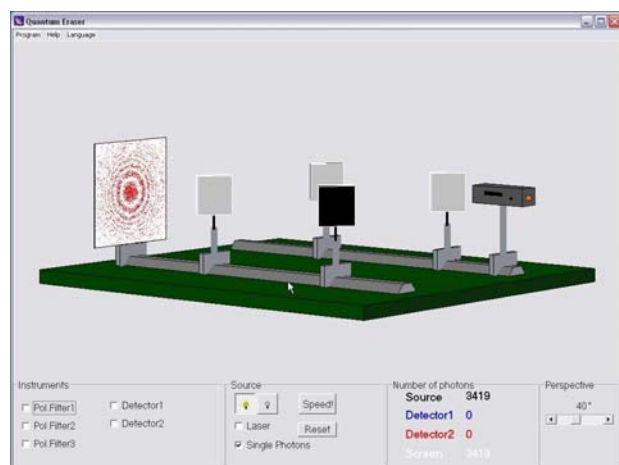


Figura 4 - Interferômetro de Mach-Zehnder [15] no regime monofotônico (um fóton de cada vez). Observa-se a formação do padrão de interferência no anteparo.

Uma possível interpretação desta experiência baseada nos nossos conceitos clássicos de onda e de partícula poderia levar à conclusão de que o fóton deve ter viajado pelos caminhos A e B de modo a combinar-se consigo mesmo construtivamente nas regiões de detecção e destrutivamente nas regiões onde o fóton não é detectado. Seguindo esse raciocínio, o fenômeno de interferência descrito acima implica que o fóton rumou por duas trajetórias distintas simultaneamente, como se ele tivesse viajado pelos dois caminhos ao mesmo tempo. Mas o fóton de Einstein é uma partícula de luz, um quantum de luz, indivisível que pode ser refletido ou transmitido com probabilidade $1/2$ nos espelhos semi-refletores, mas não pode ser dividido em dois meio-fótons. Na linguagem da MQ, diríamos que o fóton está em um estado de superposição quântica descrito pela Eq. (4).

Esse impasse pode ser teoricamente resolvido pelo postulado de de Broglie de 1925 [2], [11], [12], que diz que toda partícula microscópica tem associada a ela um tipo de onda, que, na época, o físico francês chamou de ondas-piloto. Um ano depois da publicação dos resultados de de Broglie, Born mostrou matematicamente que

essas ondas associadas à matéria não tinham propriamente um significado físico, como, por exemplo, aquele atribuído às ondas sonoras ou àquelas de uma superfície de um lago - essas ondas em si, não podem ser medidas ou detectadas. Para algumas escolas de interpretação da MQ, essa onda de matéria, que no jargão físico é denominada função de onda, não passa de uma ferramenta matemática, sem realidade física, com a qual é possível calcular a probabilidade da partícula ser encontrada em alguma região do espaço [2], [6]. As funções de onda ou pacotes de onda apresentam comportamento ondulatório, como as ondas na superfície de um lago. Quando uma dessas ondas se sobrepõe à outra, ocorre a interferência, exatamente como na teoria ondulatória da luz, desde que essas duas ondas sejam coerentes entre si, ou seja, que oscilem em sincronismo. Só que a interpretação agora é diferente: uma amplitude maior da onda em uma região do espaço indica que é mais provável encontrar o corpúsculo naquela região.

Assim, no IMZ, o estado do fóton ou sua função de onda é caracterizado pela função complexa (4), também chamada de pacote de onda. Para partículas livres em MQ - não sujeitas à ação de forças ou com força resultante nula - as funções de onda são como as vibrações de um diapasão, uma onda senoidal pura, estendida em todo espaço. Se um violino toca a mesma nota que o diapasão, o som já é completamente diferente, a corda do violino não somente vibra com a frequência fundamental, determinada pelo seu comprimento, como há também notas adicionais, os harmônicos, que correspondem a simples frações do comprimento da corda. Cada uma dessas notas adicionais ainda é uma onda senoidal, mas de frequência mais alta. É a combinação de todas as notas puras, dominadas pela mais baixa, a nota fundamental, que cria o som de um violino, cujo gráfico da onda sonora parece os dentes de um serrateiro. Por que o clarinete tocando a mesma nota soa muito diferente do violino? O gráfico da onda sonora do clarinete parece uma função de onda quadrada e a razão da diferença é que o clarinete é aberto em uma das extremidades, enquanto que a corda do violino é fixa em ambas as extremidades. Isto significa que os harmônicos produzidos pelo clarinete diferem daqueles do violino, de forma que o gráfico que representa o som do clarinete é construído de ondas senoidais oscilando em diferentes frequências.

Foi Fourier quem vislumbrou que mesmo gráficos mais complicados reproduzindo os sons de uma orquestra inteira poderiam ser decompostos em curvas senoidais simples das notas fundamentais e dos harmônicos de cada instrumento. Na MQ, o pacote de onda é composto pelas notas fundamentais do sistema quântico, uma combinação de todas as notas puras do sistema, que são seus auto-estados. No IMZ, temos “duas notas fundamentais” ou auto-estados, o caminho A e o caminho B, conforme veremos da análise do comportamento corpuscular do fóton, na sequência.

2.3. Interferômetro de Mach-Zehnder quântico - Comportamento corpuscular do fóton

Se tentarmos descobrir por qual dos dois caminhos o fóton de Einstein rumar, através de algum dispositivo de detecção, verificamos que os fótons vão ora por um caminho ora por outro, mas como resultado, acabamos destruindo o fenômeno da interferência do fóton consigo mesmo.

A possibilidade de detecção do caminho rumado pelo fóton destrói o padrão de interferência.

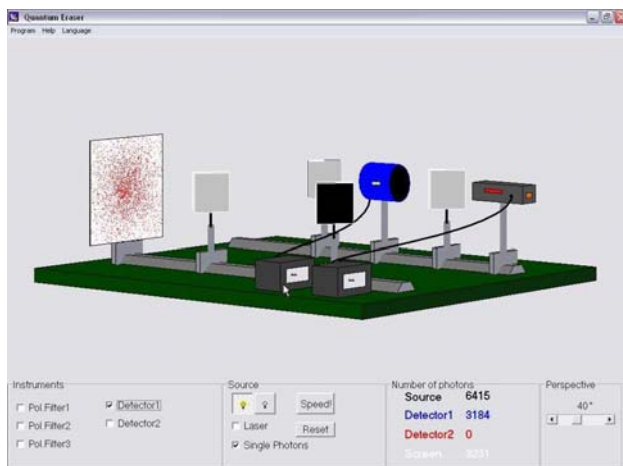


Figura 5 - Interferômetro de Mach-Zehnder [15] no regime monofotônico (um fóton de cada vez) com detector no braço interno (caminho A). Não há formação de padrão de interferência no anteparo.

Se tentarmos descobrir por qual caminho o fóton rumar através de algum dispositivo de detecção como o detector 1 colocado em A na Fig. (5), verificamos que os fótons rumam ora por A, sendo então absorvidos no detector 1, ora por B, podendo então ser detectados no anteparo que, agora, não exibe o padrão do fenômeno da interferência. Na simulação da Fig. (5), dos 6415 fótons emitidos pela fonte, aproximadamente 50% (3184) foram detectados no detector 1, enquanto que o restante seguramente rumou pelo caminho B. Os fótons que chegaram ao anteparo não exibem mais interferência. A mesma experiência pode ser simulada com o detector 2 em B e tem resultados totalmente equivalentes. Em outras palavras, ao determinarmos o caminho pelo qual o fóton está seguindo, mudamos a função de onda que o descreve: a nova função não é mais uma superposição coerente de duas contribuições, mas descreve agora um corpúsculo que foi localizado através da medida. Postula-se que a medida destrói a superposição coerente dos dois auto-estados, e transforma o estado do corpúsculo em um estado localizado [2], [3], [6].

A experiência mostra que ao colocar-se dois detectores, detector 1 em A e detector 2 em B, o fóton pode ser detectado em A ou em B. O resultado da simulação

para um número razoavelmente grande de fótons individuais se aproximará de 50% de probabilidade para cada detector, mas não haverá detecções simultâneas em A e em B - as duas possibilidades são ortogonais. Neste simulador, em particular, não será registrada a chegada de fótons ao anteparo, pois é suposto que os detectores absorvem os fótons que passam por eles.

3. Interpretações da MQ

A principal dificuldade que encontramos na MQ consiste em conciliar em termos de interpretação ou entendimento, idéias antagônicas, como o conceito de onda - fenômeno não-localizado - com o conceito de partícula, ente localizado [2], [6]. Não há no mundo clássico, analogias que permitam fundir o comportamento ora ondulatório (ver Fig. (4)), ora corpuscular da luz (ver Fig. (5)). Como resultado, a MQ é interpretada de diferentes maneiras e para cada corrente ou escola de pensamento, o resultado de um experimento - a detecção ou medida, embora sendo o mesmo, apresenta diferentes epistemologias. Para termos uma idéia das diferentes posturas assumidas pelos cientistas frente aos resultados da MQ, apresentamos a seguir, sucintamente, mas de modo correspondente aos objetivos deste trabalho, algumas das principais linhas que, embora internamente consistentes, podem ser em alguns aspectos bastante divergentes entre si: i) Interpretação ondulatória-realista, ii) a Interpretação da Complementaridade também conhecida como Escola de Copenhague, iii) a Interpretação dualista-realista e iv) a Interpretação dos Muitos Mundos.

3.1. Interpretação ondulatória-realista (proposta por E. Schrödinger em 1926)

Quando, em 1926, Schrödinger postulou a equação hoje conhecida por Equação de Schrödinger e as condições de contorno a serem impostas nas suas soluções, ele estabeleceu um formalismo em termos de conceitos de mecânica ondulatória. Esse formalismo, por ter analogias com situações idênticas ou apenas levemente modificadas em algum ramo particular da Física Clássica, como, mais especificamente para Schrödinger, a teoria clássica da eletricidade em conjunção com a hipótese de que fenômenos ondulatórios são processos básicos na natureza [6], acabou sendo amplamente adotado em livros-textos por razões didático-pedagógicas. A interpretação ondulatória atribui uma realidade ao estado Ψ sem postular que exista nada além do que descreve o formalismo quântico. O estado não é uma realidade que podemos observar diretamente, mas que através do Postulado de Born, estabelece probabilidades que evoluem no tempo como uma função de onda. A função de onda é o ponto central dessa interpretação que não apresenta nenhuma dificuldade para explicar fenômenos ondulatórios. A consequência dessa visão realista é que

as entidades dadas pela teoria quântica correspondem a algo real na natureza, independente de serem observadas ou não. Em poucas palavras, nesta interpretação, o fóton é considerado um pacote de onda.

3.2. Interpretação da Complementaridade ou Escola de Copenhague: Dualista-positivista (elaborada por Bohr - 1928 e defendida por Heisenberg, Born e Dirac)

A Interpretação da Complementaridade é mais conhecida como Escola de Copenhague por ter sido proposta primeiramente pelo físico dinamarquês Niels Bohr e veementemente defendida por seus colaboradores, não sempre em total consenso. O Princípio da Complementaridade de Bohr enunciado em 1927 estabelece que não é possível, num mesmo experimento, fazer com que, de forma simultânea, a luz mostre suas características corpusculares e ondulatórias. Nessa interpretação, admite-se que o fóton ou qualquer partícula microscópica possa se comportar como onda ou partícula, mas nunca ambos ao mesmo tempo, dependendo do arranjo experimental colocado pelo experimentador. Essa é uma interpretação também chamada de dualista-positivista, pois admite a dualidade onda-partícula, mas considera que a teoria só consegue descrever aquilo que é observável. O estado Ψ é meramente um instrumento matemático para realizar cálculos e obter previsões, e portanto, desprovido de realidade física. A consequência direta desta visão positivista é que nada se pode dizer a respeito do comportamento de um fóton, por exemplo, em uma experiência antes da detecção deste fóton. Somente após a detecção pode-se então concluir se o comportamento assumido foi ondulatório ou corpuscular.

Apesar da rejeição de Schrödinger e Einstein, a Interpretação da Complementaridade teve ampla aceitação entre físicos pelos menos nos seus primeiros vinte anos. O sucesso da MQ em todos os campos da microfísica, levou a maioria dos físicos a se interessar mais por suas aplicações em problemas práticos e em suas extensões para áreas ainda não exploradas [6]. Assim, não é exagerado dizer que a maioria dos livros-textos lidam quase que exclusivamente com um ou dois formalismos, abordando, em geral, técnicas para se resolver problemas específicos, deixando pouco ou nenhum espaço para questões epistemológicas.

3.3. Interpretação dualista-realista (De Broglie 1925/ David Bohm, 1952)

Muito embora poucos poderiam dizer o que seriam as variáveis ocultas propriamente, essa interpretação também é amplamente conhecida como teoria das variáveis ocultas. Essa interpretação de cunho realista

tenta conciliar o fenômeno ondulatório com o fenômeno corpuscular na mesma experiência. Para os dualista-realistas, cada sistema quântico individual descrito pelo estado Ψ é também caracterizado por estados adicionais ocultos rotulados por um parâmetro λ , que seria a partícula com posição e velocidade bem determinadas [2], [6]. O estado Ψ seria uma onda-piloto ou campo de probabilidades que guia a partícula, mas sem carregar energia. A energia estaria concentrada na partícula. Ψ e λ juntos determinam o resultado da medida de um observável no sistema. Simplificando, o fóton é considerado uma partícula a qual se associa uma onda de matéria (ou onda piloto).

3.4. Interpretação dos muitos mundos (proposta por Hugh Everett III em 1957)

Essa também é essencialmente uma interpretação de caráter ondulatório-realista. Apesar de sua desconcertante estranheza, esta corrente de pensamento originou-se entre grupos da área de teoria quântica da relatividade geral. A idéia da quantização do universo (sistema isolado, fechado) e a idéia de uma função de onda para todo o universo trouxeram dificuldades para as interpretações dualistas disponíveis na época [6]. Não poderia haver espaço para aparatos ou dispositivos de medida clássicos e, muito menos, um observador externo. Foi Hugh Everett III, um estudante de doutorado de John Wheeler, que propôs a idéia que numa medida *todos* os valores possíveis da propriedade que está sendo medida são obtidos ou “atualizados”, ao mesmo tempo. Os resultados ocorrem todos simultaneamente, porém em mundos diferentes. Nesta interpretação, o fóton é um pacote de onda.

Para finalizar essa seção cabe salientar que há outros aspectos importantes de cada interpretação que não foram abordados neste trabalho, por fugir dos nossos objetivos centrais. O problema do colapso da função de onda², por exemplo, abordado por Pessoa em [2,3] sob várias interpretações, é um diferencial da Interpretação dos Muitos Mundos. A interpretação dos muitos mundos não precisa recorrer ao colapso da função de onda. A Interpretação de Copenhague faz uma distinção clara entre observador e ente observado: quando não há observador, o sistema evolui deterministicamente, segundo a Equação de Schrödinger, mas na presença do observador, a função de onda sofre um colapso - o ato de observar o sistema, muda o sistema. Na Interpretação dos Muitos Mundos, observador e ente observado são modelados conjuntamente, não há colapso da função de onda e a MQ continua, portanto, sendo determinística, sem recorrer às variáveis ocultas. Isso foi uma clara tentativa de resgatar o determinismo. No entanto, a

²Colapso da função de onda é um postulado fundamental da MQ. Trata-se da chamada “redução de estado”, a qual resulta do ato de medir. No caso do IMZ, ocorre o colapso da função de onda quando, por exemplo, introduzimos um detector em um dos braços, destruindo o estado de superposição quântica do fóton, pois os fótons que chegarem a esse detector estão em um determinado auto-estado do sistema e não mais no chamado estado de superposição quântica.

grande dificuldade da interpretação dos muitos mundos está no fato de que estes mundos formam um conjunto de subsistemas complexos, causalmente conectados, que não interferem uns com os outros. Em termos dos auto-estados, um mundo é uma das componentes da superposição Ψ , uma das “notas do sistema”, que representa um dos macroestados possíveis.

4. Interpretações da MQ no IMZ

Com o objetivo de elucidar as dificuldades e divergências entre as várias interpretações da MQ, analisaremos o IMZ no regime monofotônico em duas situações distintas: 1) o IMZ usual exibindo padrão de interferência no anteparo e 2) o IMZ com detector em um dos braços exibindo padrão de detecção corpuscular sob as interpretações: i) ondulatória, ii) dualista-realista, iii) da complementaridade e iv) dos muitos mundos.

4.1. Padrão de Interferência no regime monofotônico no IMZ (Fig. 4)

No arranjo da Fig. 4, o padrão observado no anteparo após a emissão de um número relativamente grande de fótons, um por vez, é um padrão de interferência.

4.1.1. Interpretação ondulatória-realista

Naturalmente, essa interpretação não vê dificuldades para explicar um padrão de interferência típico de ondas. Para os adeptos da interpretação ondulatória, o fóton é descrito por um pacote de ondas que, ao chegar no primeiro espelho semi-refletor S1, divide-se igualmente em duas partes, uma onda transmitida que rumo por A e outra refletida que rumo por B (Fig. (2)). Essas ondas acumulam defasagens devido à diferença dos caminhos ópticos no IMZ. Ao chegarem ao segundo espelho semi-refletor S2, parte da onda que rumou por A é refletida para o anteparo e parte da onda que rumou por B é transmitida para o mesmo. Essas ondas recombinam-se no anteparo alternando regiões de interferência construtiva com regiões de interferência destrutiva. A detecção do fóton no anteparo continua sendo puntual, o fóton é detectado como uma partícula, mas isso não representa uma dificuldade para esse grupo, pois o colapso da função de onda é assumido no processo de detecção. A detecção do fóton, no entanto, se dá somente em regiões nas quais as ondas que rumaram para o anteparo (detector) satisfazem a condição de interferência construtiva (Eq. (8)).

Para a interpretação ondulatória, a observação da interferência exclui afirmações do tipo “o fóton foi por um caminho ou por outro”. Só podemos dizer que o fóton é descrito por uma função de onda que o localiza em torno dos dois caminhos ao mesmo tempo.

4.1.2. Interpretação dualista-realista

Essa interpretação tenta conciliar o fenômeno ondulatório indicado pela formação do padrão de interferência com a detecção localizada do fóton no anteparo. No IMZ, a onda-piloto do fóton que deixa a fonte, ao deparar-se com o espelho semi-refletor S1, é dividida em duas partes iguais. Parte da onda associada rumo por A e parte por B. Essas ondas voltam a somar-se construtiva ou destrutivamente no segundo espelho semi-refletor S2, determinando assim, as probabilidades de detecção do fóton nas diferentes regiões do anteparo. O fóton, contudo, segue uma das possíveis trajetórias, A ou B, determinada pelas variáveis ocultas, mas essa informação é inacessível ao experimentador. A detecção do fóton se dará somente onde há interferência construtiva das ondas de probabilidade.

4.1.3. Interpretação da complementaridade - dualista positivista

Nessa interpretação, admite-se que o fóton ou qualquer partícula microscópica possa se comportar como onda ou partícula, mas nunca ambos ao mesmo tempo, dependendo do arranjo experimental colocado pelo experimentador. No IMZ não faz sentido perguntar se o fóton vai se comportar como onda ou como partícula sem antes realizar a detecção. Após a detecção, pode-se concluir qual a característica exibida pelo fóton no IMZ.

Assim, como um fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular, mas nunca ambos simultaneamente e o resultado do experimento (Fig. 4) indica interferência, conclui-se que o fóton comportou-se como onda. Para explicar a detecção puntual no anteparo, Bohr recorreu à idéia de que no momento da detecção em si, há uma espécie de descontinuidade, associada com a interação do fóton com a matéria (anteparo) [2], [3], [6]. Esse processo descontínuo é bastante complexo e foge ao objetivo deste texto. De qualquer maneira, vale ressaltar que a detecção é sempre puntual, não importando qual o caráter assumido pelo fóton no experimento. O local da detecção sim, depende do caráter assumido (ou determinado a priori pelo experimentador) pelo fóton no experimento.

4.1.4. Interpretação dos muitos mundos

Quando o fóton no IMZ passa pelo primeiro espelho semi-refletor S1, o universo inteiro se duplica, com os físicos e tudo. Nessa interpretação, sempre que um número de possibilidades viáveis existe, o mundo se divide em muitos mundos, um mundo para cada uma das diferentes possibilidades. Quando o fóton atinge o espelho semi-refletor S1, há o surgimento de dois mundos idênticos, um com IMZ + experimentador + fóton no caminho A e outro com IMZ + experimentador + fóton no caminho B. Um mundo ignora a existência

concomitante do outro, pois os dois mundos não interferem. Para que os dois mundos interfiram um com o outro, todos os átomos, partículas subatômicas, fótons e outros graus de liberdade têm que estar no mesmo estado, o que significa que eles devem estar no mesmo lugar ou ter uma sobreposição significativa em ambos os mundos simultaneamente. Para que essa sobreposição dos mundos A e B no IMZ aconteça, precisamos que os caminhos A e B se cruzem novamente para que um padrão de interferência se forme. Assim, ao chegar no espelho semi-refletor S2, os dois mundos antes independentes se superpõem e a detecção do fóton somente se dá em regiões de interferência construtiva no anteparo.

4.2. Padrão corpuscular no regime mono-fotônico no IMZ (Fig. 5)

No arranjo da Fig. (5), o padrão observado no anteparo após a emissão de um número relativamente grande de fótons, um por vez, é um padrão corpuscular.

4.2.1. Interpretação ondulatória-realista

É bastante natural que teorias ondulatórias apresentem dificuldades para explicar padrões corpusculares. Como já vimos, na interpretação ondulatória, o fóton é descrito por um pacote de onda que se divide em duas partes iguais no primeiro espelho semi-refletor S1. Parte do pacote de onda segue pelo caminho A, enquanto que a outra parte segue por B. O problema é que, na simulação indicada na Fig. (5), ou há detecção do fóton no detector 1 e nenhuma detecção no anteparo ou há detecção do fóton no anteparo sem nenhuma acusação de passagem do fóton no detector 1. Não há ocorrência simultânea de detecção no detector 1 e no anteparo.

O simulador permite a inserção de um detector 2 no caminho B. Com detector 1 e detector 2 ativos pode-se verificar que 50% dos fótons rumam por A e 50% por B de forma aleatória como a ocorrência de cara e coroa no jogo da moeda, mas não há detecção simultânea nos detectores. A interpretação ondulatória não explica o fato que somente um dos detectores acusa a chegada do fóton, sem recorrer a não-localidade no colapso da função de onda. Nessa interpretação, a detecção do fóton acontece no detector em que o colapso aconteceu, sobrando uma onda vazia no detector silencioso [2], [6].

4.2.2. Interpretação dualista-realista

Nesta interpretação, a onda-piloto ou onda associada, que acompanha o fóton, divide-se em duas partes iguais no espelho semi-refletor S1, mas o fóton segue uma das trajetórias A ou B desconhecida para o experimentador. A onda piloto determina a probabilidade do fóton rumar por A e ser, portanto, acusado no detector 1 ou de rumar por B e ser acusado no anteparo. Ao se executar a simulação com detector 1 em A e detector 2 em

B, a onda piloto ditará probabilidades iguais do fóton rumar por A ou por B.

Novamente, conforme se é esperado de interpretações com componentes ondulatórias, há dificuldades para se explicar o resultado corpuscular desta experiência, sem recorrer a colapsos não-locais da função de onda. De algum modo, a partícula fóton é acusada no detector onde a onda piloto determina maior probabilidade de se encontrar o fóton, a partícula “surfa” com a onda conforme Pessoa [2]. No outro detector, deve ter sobrado uma onda vazia.

4.2.3. Interpretação da complementaridade

Nessa interpretação, admite-se que o fóton pode se comportar como onda ou partícula, mas nunca como ambos ao mesmo tempo, dependendo do arranjo experimental colocado pelo experimentador. Não faz sentido perguntar se o fóton se comportará como onda ou partícula sem antes realizar a detecção. Após a medida, pode-se concluir qual a característica exibida pelo fóton naquele experimento. Na simulação da Fig. (5), ou o detector 1 acusa o fóton e não há detecção no anteparo ou há a detecção no anteparo sem registro da passagem do fóton pelo detector 1. Assim, o resultado da simulação permite concluir que, o fóton se comportou como partícula e foi transmitido ou refletido em S1 com probabilidade 1/2.

4.2.4. Interpretação dos muitos mundos

Na interpretação dos muitos mundos, o fóton perfaz todas as possibilidades simultaneamente, ou seja, ao deparar-se com o espelho semi-refletor S1, ele rumar por ambos caminhos A e B, mas esses caminhos constituem dois mundos paralelos que só voltarão a se interferirem no segundo espelho semi-refletor S2. Assim, se o experimentador A, no mundo A, observa a detecção do fóton no detector 1, um observador B, no universo B, indiferente à existência do observador A, observa a possibilidade B, que é a detecção do fóton no anteparo. Observe que não há formação de um padrão de interferência no anteparo, o que pode ser explicado pelo fato de que, diferentemente da situação mostrada na seção 4.1, a colocação de um detector no braço A do IMZ, torna a sobreposição dos mundos em S2 assimétrica (o fóton detectado é absorvido no detector 1) e o padrão de interferência é destruído.

A interpretação é exatamente a mesma para a simulação com os detectores 1 no caminho A e detector 2 no caminho B. O fóton rumar pelos caminhos A e B simultaneamente, mas esses caminhos constituem dois mundos diferentes. A detecção do fóton no detector 1 pelo experimentador A, no mundo A, implica detecção do fóton no detector 2 pelo experimentador B no mundo B; mas o experimentador A não é consciente da existência do experimentador B. Nenhum fóton chega ao

anteparo, pois o simulador supõe a absorção do fóton na detecção.

5. Considerações finais

O avanço da tecnologia na escala dos nanômetros tem permitido a realização de experimentos, antes puramente mentais, que podem colocar à prova questões fundamentais da física da escala atômica, a física quântica. Experimentos sofisticados têm corroborado cada vez mais os resultados pouco intuitivos dessa teoria. As estranhezas da MQ [16] suscitam questões que vão da falta de adequação da nossa linguagem ‘clássica’ na descrição dos fenômenos microscópicos até a necessidade de uma nova lógica de pensar, a lógica quântica [6].

As interpretações exclusivamente ondulatórias têm dificuldades para explicar fenômenos corpusculares, assim como as interpretações exclusivamente corpusculares apresentam dificuldades para explicar interferência, por exemplo. A Interpretação da Complementaridade concilia ambos aspectos - corpusculares e ondulatórios - mas de forma excludente e a Interpretação dos Muitos Mundos, embora evite a dificuldade do colapso da função de onda, não se torna mais fácil quando introduz a criação desses entes matemáticos abstratos com seus mundos complexos, dos quais não “temos” consciência. Seriam as disparidades nas interpretações dos fenômenos quânticos uma fragilidade da teoria ou o indício de que a humanidade ainda trilhará novos modos de pensar? A discussão da odisséia do fóton no IMZ, baseada em um simulador de fácil manuseio disponibilizado na rede www, é uma importante contribuição que vem somar-se às referências para a formação inicial e continuada de professores de Física [17], [18], principalmente quando se tenta resgatar abordagens conceituais de MQ que estão fortemente imbricadas com seus aspectos ontológicos e epistemológicos.

Não foi nosso objetivo, nesse trabalho, defender uma dada interpretação, mas colocar a necessidade de trazer à tona a riqueza e a diversidade do debate acerca de aspectos conceituais e epistemológicos da MQ. Do ponto de vista de seu ensino, em cursos de formação de professores, acreditamos ser fundamental a construção de abordagens didáticas mais conceituais e qualitativas fundamentadas na pluralidade de interpretações. O conceitual e o epistemológico, portanto, estão completamente imbricados quando pensamos no processo de ensino-aprendizagem de MQ.

Agradecimento

Fernanda Ostermann agradece apoio parcial do CNPq.

Referências

- [1] O. Pessoa Jr., Revista Brasileira de Ensino de Física **19**, 27 (1997).
- [2] O. Pessoa Jr., *Conceitos de Física Quântica* (Livraria da Física, São Paulo, 2003).
- [3] O. Pessoa Jr., Cadernos de História e Filosofia da Ciência, Série 3, **2**, 177 (1992).
- [4] L.R.W. Abramo, “Geografia do Universo”, <http://fma.if.usp.br/abramo/RevUsp.htm> (Instituto de Física, Universidade de São Paulo, SP).
- [5] A. Zeilinger, in *On the Interpretation and Philosophical Foundation of Quantum Mechanics*, editado por L.U. Ketvel et al., *Vastakohtien todellisuus, Festschrift for K.V.* (Helsinki University Press, Helsinki, 1996).
- [6] M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley-Interscience Publication, Estados Unidos, 1974).
- [7] S.S. Chibeni, *Aspectos da Descrição Física da Realidade (Coleção CLE, v. 21, Centro de Lógica da Unicamp, Campinas, 1997).*
- [8] S.S. Chibeni, Revista ComCiência, SBPC/Labjor, maio/2001.
- [9] L. Lising e A. Elby, American Journal of Physics, aceito em Novembro 2004. Acessível em physics/0411007.
- [10] J.B. Bastos Filho, Revista Brasileira de Ensino de Física **25**, 125 (2003).
- [11] Eisberg & Resnick, *Física Quântica* (Editora Campus, São Paulo, 1994).
- [12] P.A. Tipler, *Física Moderna* (Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2001).
- [13] M. Arndt, et al., Nature **401**, 680 (1999).
- [14] R. Müller and H. Wiesner, American Journal of Physics **70**, março 2002.
- [15] R. Müller e H. Wiesner, *Interferômetro de Mach-Zehnder*, simulador disponível em: <http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfere.html>.
- [16] M. Tegmarck e A. Wheeler, *100 Anos de Mistérios Quânticos* (excelente tradução para o português disponível em http://www.ucs.br/ccet/defq/naeq/material_didatico/textos_interativos_18.htm)
- [17] T.F. Ricci e F. Ostermann, *Uma Introdução Conceitual à Mecânica Quântica para Professores do Ensino Médio* (Textos de Apoio ao professor de Física, n. 14, Instituto de Física da UFRGS, Porto Alegre, 2003).
- [18] F. Ostermann e T.S.F. Ricci, in *Uma Unidade Didática Conceitual sobre Mecânica Quântica na Formação de Professores de Física*, Atas do IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (Bauru, SP, 2003), em CD-ROM.